

7 超小型 KURAMA-II

7.1 超小型 KURAMA-II のあらましと

Single-board Computer とは、従来の組み込みシステムのためのワンボードマイコンと同様に名刺大程度のプリント基板上に CPU やメモリ、入出力インターフェースを装備したものでありながら、Linux のような汎用 OS を積んでいてパソコン的な使い方にも十分対応できるものである。近年の半導体技術の進展による能力向上や小型化も進んで、様々なシングルボードコンピュータが登場しており、IoT における重要なツールとして市場は活況を呈している。

そういう Single-board Computer の中でも、ソニーが 2018 年に発表した Spresense[26] は、Spresense は Arduino に近い低消費電力でありながら、GNSS 受信機やハイレゾ音源対応のオーディオコーデック等を内蔵するとともに、6 個の CPU を搭載したマルチコア構成を採用することで、個人でも容易に高性能で汎用性の高いアプリケーションの開発を実現できる Single-board Computer である。Spresense の搭載する LSI のあらましを図 40 に示す。

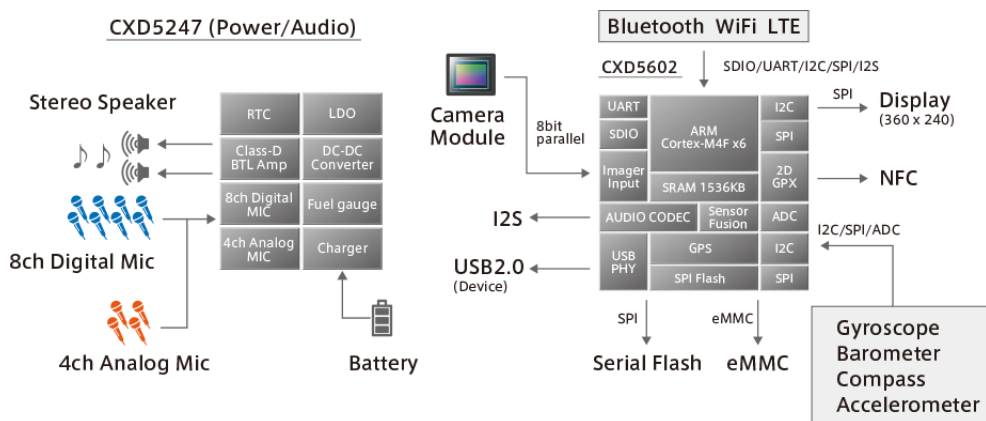


図 40 Spresense の搭載する LSI(CXD5602/CXD5247) のあらまし。オーディオ信号処理とバッテリーマネジメントを受け持つ CXD5247 と ARM の 6 コアプロセッサを搭載し、一般的な演算処理や画像処理、各種インターフェースを受け持つ CXD5602 を搭載している。

本研究ではこの Spresense を活用した超小型 KURAMA-II を製作し、LPWA と組み合わせた機動的な展開のできる放射線計測システムを開発することを目標としている。前年度には超小型 KURAMA-II に必須の機能である

- GNSS による測位機能
- 超小型 KURAMA-II 用検出器の開発
- 放射線計測用アルゴリズムの開発

の基本的な開発が完了していることから、本年度は

- 超小型 KURAMA-II に実装する検出器の製作
- 放射線計測用アルゴリズムの改良

- 実証検証用超小型 KURAMA-II の製作

が目標となる。

7.2 超小型 KURAMA-II に実装する検出器の製作

前年度の研究では、C12137-00 を放射線入射時のパルス出力をピークホールドした値を出力するように改造した評価用検出器を製作し、この検出器のピークホールド出力の波高を Spresense の搭載する ADC で測定することに成功したものの、得られたスペクトルは C12137-00 と比べてエネルギー分解能などに問題があった。検出器と ADC 間が仮配線であることに由来する電氣的ノイズを確認していたことから、このノイズがエネルギー分解能悪化の原因として指摘した。

この前年度の結果を踏まえ、超小型 KURAMA-II に搭載する CsI(Tl) 検出器を設計製作した (図 41)。前年度の試作品と基本的な構成は同じであるが、変更点としては、

- アナログ回路を ASIC (特定用途向け集積回路) で再設計して小型化・省電力化を図った
- アナログ回路と MPPC 用高電圧回路を 32 mm 角の基板に集約した
- 配線を最短にするためメインボードにコネクタで直付する形態にした
- Spresense の ADC のサンプリング速度が 500 kS/s に合わせてピークホールド時間を $4\mu\text{s}$ 以上に伸ばせるようにした

である。

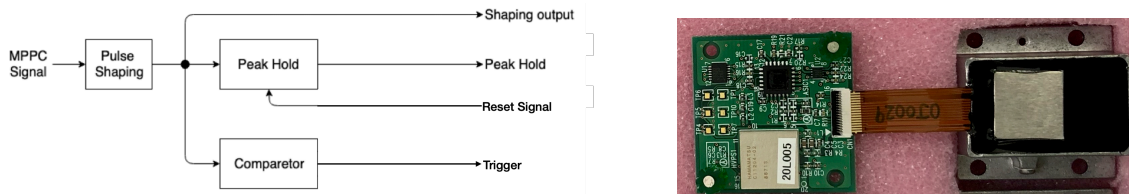


図 41 (左) 超小型 KURAMA-II 用 CsI(Tl) 検出器の外観。CsI(Tl) と MPPC は C12137-00 と同じアルミニウム製の容器にモールドされている。基板には MPPC 用高電圧電源の IC と MPPC からのアナログ信号処理をする ASIC が搭載されている。(右) ASIC の内部構成。シェイピングアンプで整形されたパルスの波高を保持するピークホールド回路とパルス入力検知のためのコンパレータが内蔵されている。

ASIC (特定用途向け集積回路) は、特定目的のカスタム設計の回路を集積した集積回路であり、必要な回路を最適な形態で実装していることから量産時のコストパフォーマンスに優れている。その一方で細かい仕様変更のたびに内部の設計のやり直しとなるため、細かい仕様変更を繰り返す試作目的には適していないという欠点もある。今回の超小型 KURAMA-II は、その使用方法や目的から言って普及時には従来のモニタリング機材よりも多数の生産を見込むべきものである。また前年度の試作により概ねパラメータも決定していたことから量産化を見据えて ASIC でのアナログ信号処理系の実装を試みた。

この検出器単体で動作させた時の典型的な出力波形を図 42 に示す。今回の ASIC は +3.3 V の単一電源で動作させており、有効出力範囲が 0.5 ~ 1.8 V となった。なお Spresense 側の ADC の入力範囲は 0 ~ 1.6 V であり、ASIC の出力をほぼカバーしている。

今回の検出器の試作の最中に従来使用していた MPPC が廃番となり、その後継品となる新しい MPPC 浜



図 42 今回製作した CsI(Tl) 検出器からの典型的な出力信号。黄色の波形がピークホールド出力。青の波形がコンパレータ出力。この場合、コンパレータ出力のタイミングから $8\mu\text{s}$ 後に外部回路からピークホールド回路向けにリセット信号を送り出している。

ホト S14160[28] を使用することとなった。新しい MPPC は性能向上により従来品よりも入射光量に対する出力電荷量が大きくなっており、従来品に最適化した ASIC では内蔵するアンプが飽和してしまうことがわかった。これにより観測できる γ 線のエネルギー範囲が狭くなってしまいう問題が発生している。なお、ASIC を使用しているためアンプのゲインを調整するには ASIC チップの再設計と製作が必要になるが、検出器メーカーである浜松ホトニクス社の ASIC 開発グループのスケジュールと再設計と製作の費用の問題で今回の事業の範囲内では実施が困難となりゲイン調整は断念している。この問題については後述する。

7.3 超小型 KURAMA-II 試作機の製作

検出器と通信モジュール、Spresense を取り付けるための超小型 KURAMA-II のメインボードは今回新規に設計した。その回路図を図 43 に示す。

このメインボードは外部から USB-micro コネクタで供給される +5 V で動作し、Spresense と接続するための 100 pin フラットコネクタ、超小型 KURAMA-II 用の検出器と接続するための 30 pin フラットコネクタ、および ZETA モジュールを搭載するためのピンコネクタを実装している。また、各モジュール間でロジック信号が 1.8 V と 3.3 V で混在していることから、シングルゲート IC によるレベル変換のための回路を搭載するとともに、Spresense がデータ保存や設定ファイルの読み出しに使用する microSD カードスロットとインターフェースを搭載している。またボード上にはそれぞれのモジュールが必要とする動作電圧を供給するための電源も搭載している。内部ではアナログ系とデジタル系それぞれに 3.3 V が供給できる仕様になっているが、現時点ではメインボード上でアナログ信号の増幅等は行わないためアナログ系電源は使用していない。このボードの大きさは $100\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ となっており、市販の防水・耐衝撃構造をもつプラスチックケースに組み込んで使用することを想定している。実際に各モジュールを搭載した状態およびケースに組み込んだ状態を図 44 に示す。組み込みにあたっては、電源となる Li-ion バッテリーや LPWA のアンテナも内蔵するため外部にコネクタ等は一切持たず、耐環境性能が向上している。

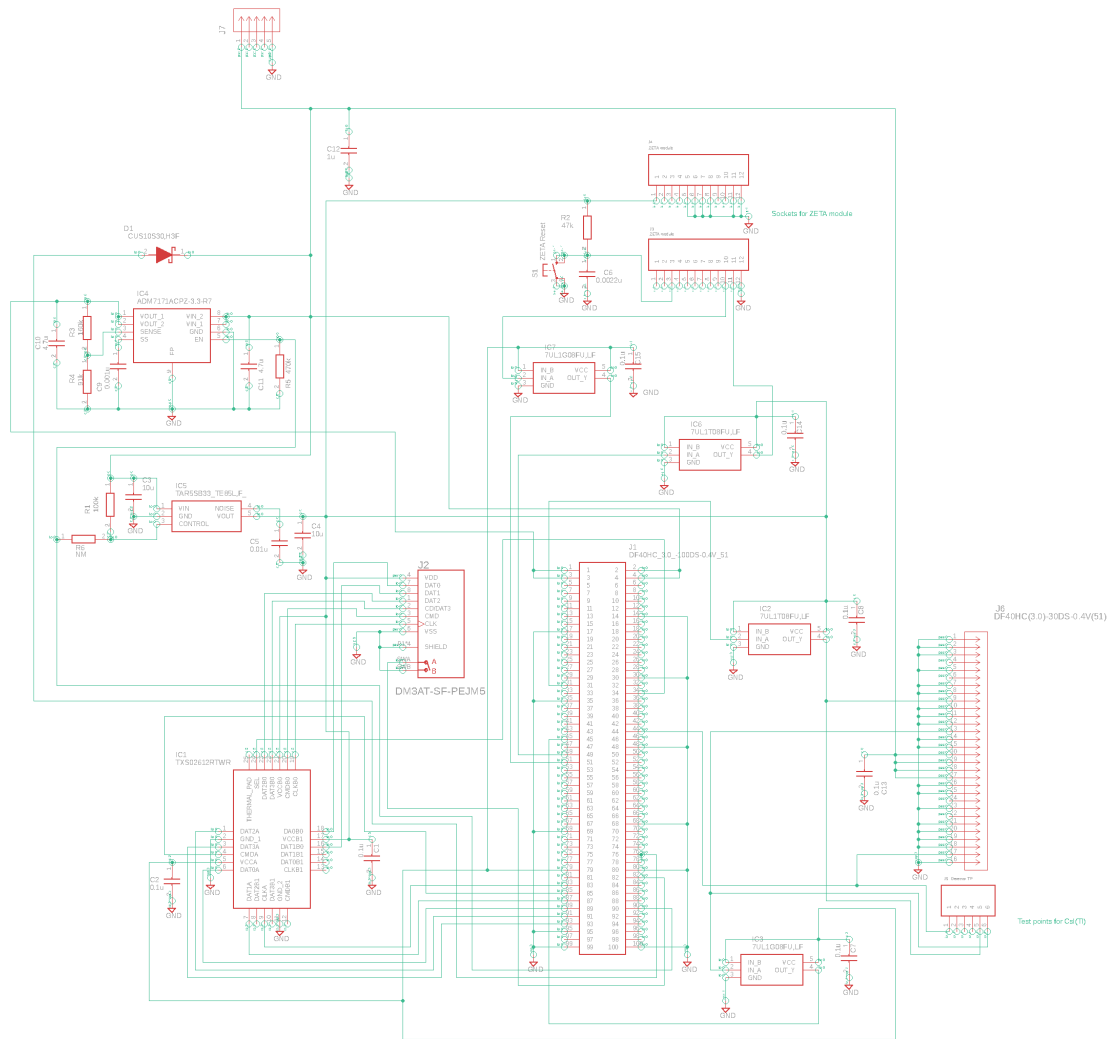


図 43 超小型 KURAMA-II のメインボードの回路図。Spresense と浜ホト製作の CsI(Tl) 検出器、ZETA モジュールを搭載するためのインターフェースを搭載し、Spresense はこの基板を経由して microSD カードの読み書きが可能になっている。

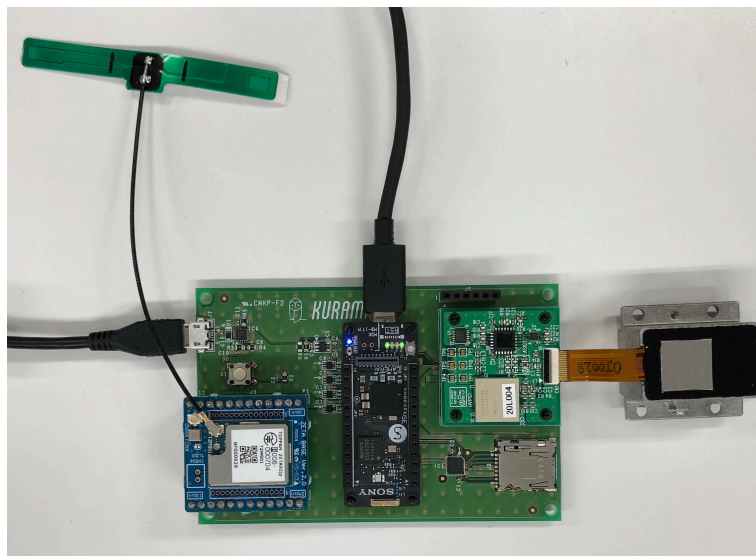


図 44 超小型 KURAMA-II のメインボードに Spresense と検出器および ZETA モジュールを搭載したところ(上)と、Li-ion バッテリー等を実装して防水ケースに組み込んだ様子(下左)およびその外観(下右)。160 mm × 100 mm の葉書大の大きさになっており、容易に携行し設置できる様になっている。

7.4 Spresense のソフトウェア改修

今回製作した検出器では、ピークホールドの終了タイミングを外部から制御できるようにすることで、Spresense ADC による波高測定に必要な時間を確保できるようにしている。そのため測定に必要な時間を経過した時点で Spresense からピークホールド回路のリセット信号を送出するようにした。当初は Spresense の ADC でパルスを検出した後 Spresense のデジタル出力端子からリセットのためのゲート信号を送出する計画であった。しかし、ADC を受け持つ CPU コアとデジタル I/O の CPU コアが独立しており、相互連携させると ms 単位の遅延が発生してピークホールド回路のリセットがうまくできないことがわかった。このため、コンパレータからのゲート信号をデジタル入力で受け、同じ CPU コアの受け持つデジタル出力端子から処理時間分だけ遅延させたゲート信号を出力させることにした。

また、デジタル入出力を受け持つ CPU コアと ADC を受け持つ CPU コアの同期が取れないため、コンパレータ出力を利用してパルスの検知ができない。そこで、常時 ADC を稼働させ、常時入力電圧を監視、閾値以上の出力が得られた場合に後続の一定時間内の ADC 出力値から波高を算出する方法を取ることにした。

Spresense によりコンパレータ出力から $16 \mu\text{s}$ 後にリセット信号を出力するようにした上で、Spresense の ADC で取得したピークホールド信号の波形を図 45 に示す。500 kS/s の ADC であれば、十分長い時間ピークホールド値に相当する一定値を出力するはずであるが、明らかに鈍った波形になっており、その形状から 500 kS/s よりも十分低いカットオフ周波数のフィルタがかかっているように見えた。この原因は Spresense の ADC がハイレゾオーディオにおける利用を想定して実装されたため、ハイレゾオーディオを入力した時の見かけ上の ADC の分解能を上げるためにカットオフ周波数 32 kHz の LPF を内部に実装しているためとわかった。このフィルタを外すことはできないため、やむを得ず得られた波高の立ち上がりから 7~9 点目をフラットな部分とみなし、この高さを波高値とすることとした。

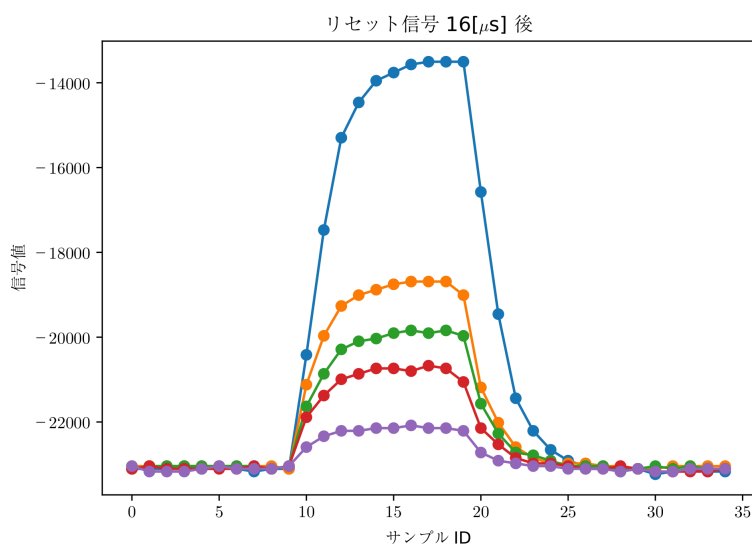


図 45 Spresense の ADC で取得したピークホールド信号。サンプル ID は ADC のサンプリングタイミング (約 $2 \mu\text{s}$ 周期) で、コンパレータ出力から $16 \mu\text{s}$ 後にリセットをかけている。

さらに、ADC 出力の長時間変動を観測すると、前年度ほどではないものの無信号入力時の ADC 出力の値が変動していることがわかる (図 46)。

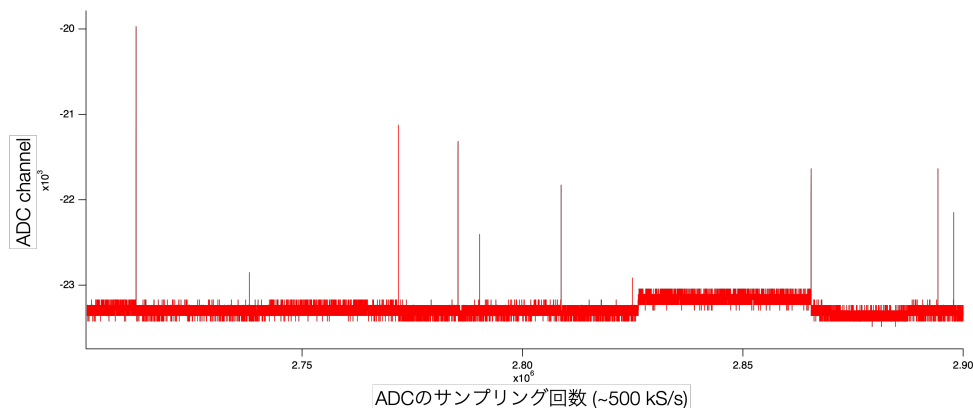


図 46 無信号時の出力レベルが変動している様子。

この変動はエネルギー分解能悪化の要因となるため、変動の影響を抑えるよう波高決定のアルゴリズムを変更することとした。新しいアルゴリズムでは、常時 ADC の値の移動平均値をとって直近の無入力時の ADC の値を決定し、パルス立ち上がり判定をこのレベルより十分大きくなった場合とした上でフィルタの効果を考慮した波高値の決定を行い、そこから直近の無入力時の ADC の値を差し引くこととした (図 47)。

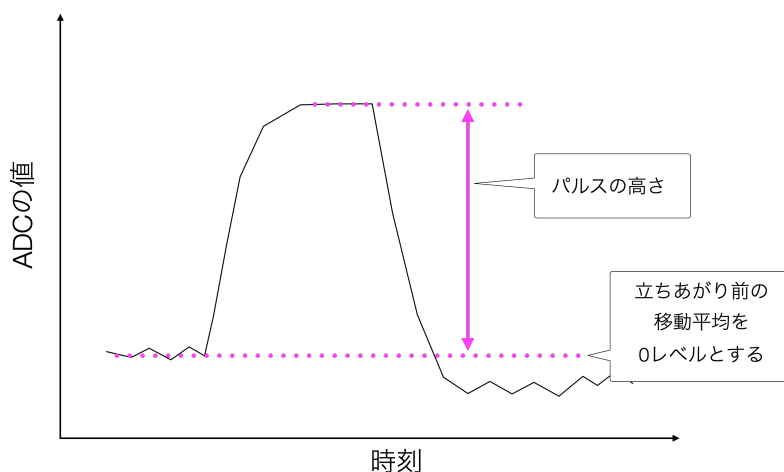


図 47 ベース変動を前提とした波高測定のご概念図。

このようにして得たトリウムを含有する天然鉍石を線源としたときの超小型 KURAMA-II および同じ CsI(Tl) 結晶を使用する C12137-00H の波高スペクトルを図 48 に示す。測定可能なエネルギー範囲が大きく制限されていることがわかる一方、測定可能な範囲では従来の CsI(Tl) 検出器と同等のエネルギー分解能を実現していることがわかる。またこの結果より、Spresense の内蔵するフィルタの効果や 0 レベルの変動への対応がうまくいっていることがわかる。また、ADC の入力範囲では ^{208}Pb の 583 keV が見えており、約 700 keV 程度までの γ 線が弁別できると見込まれる。

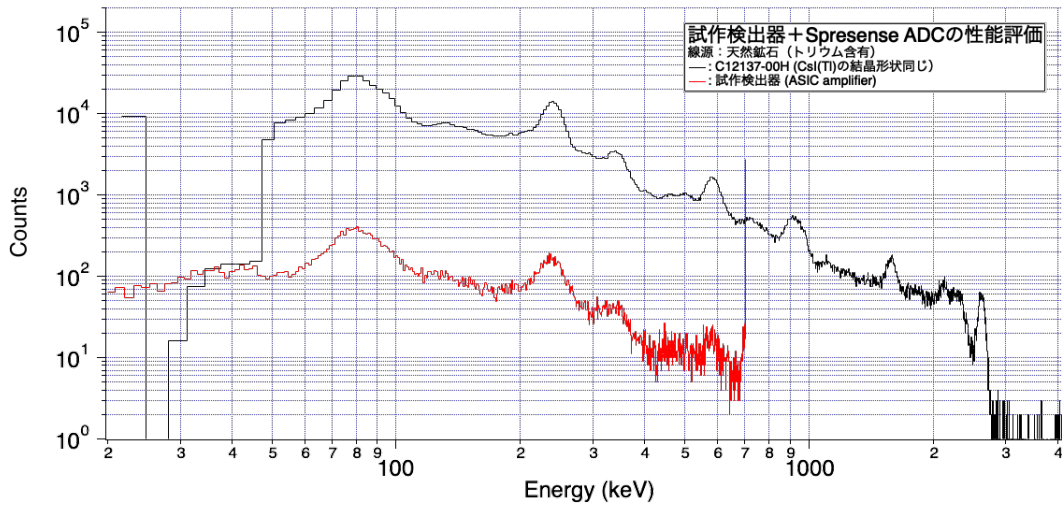


図 48 0 レベルの変動を考慮した波高測定法を実装して超小型 KURAMA-II で測定したスペクトル (赤) と比較のため同じ CsI(Tl) 結晶を持つ検出器である C12137-00H のスペクトル (黒)。

また、図 49 は今回の検出器の ^{133}Ba 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co の場合の波高分布である。 ^{137}Cs のピークの分解能が悪化し左右非対称な歪みが明らかになっており、図 48 と合わせて考えると、600 keV 程度を超えたあたりから ASIC の飽和によるエネルギー直線性の悪化が発生していると思われる。

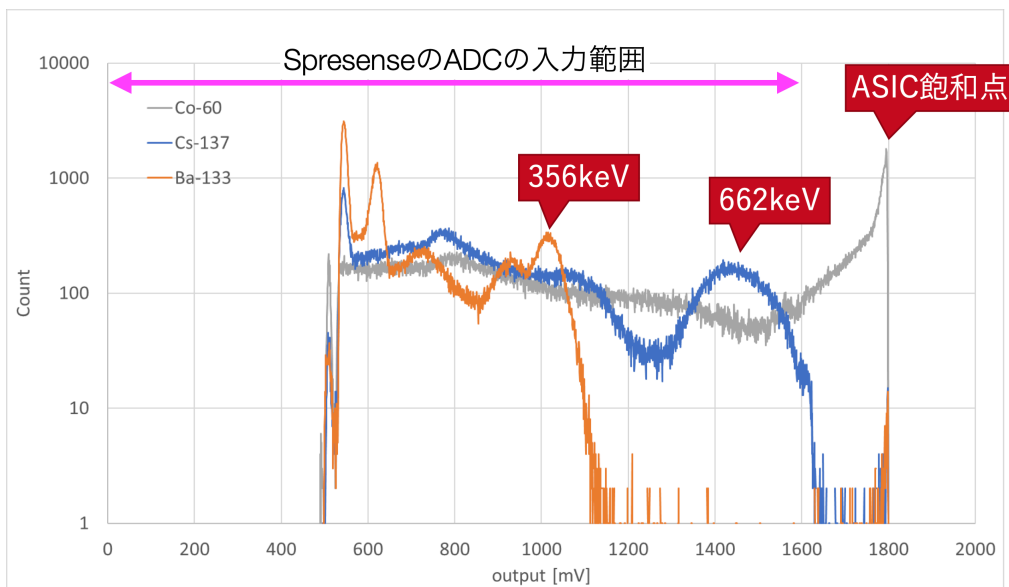


図 49 超小型 KURAMA-II 用検出器の ^{133}Ba 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co の場合の波高分布。 ^{137}Cs くらいから上での非直線性が顕著であること、Spresense ADC の入力範囲 0 ~ 1.6 V は非直線性の顕著になり始める領域を含んでいることがわかる。

今回の結果から、今回の ASIC では観測したい γ 線のエネルギー範囲に対応する波高を 0.5 ~ 1.4 V の範囲に調整することができれば良好な結果が得られることがわかる。今回新しく採用した MPPC である S14160

では、一般的な光センサ市場で求められる photon あたりの出力電荷量の向上を達成した結果、同じシンチレータを使用している従来品より同じエネルギーの γ 線に対する出力が増大している。そのため、従来品の MPPC を想定して設計したゲインのアンプを内蔵する ASIC では ^{137}Cs の 662 keV のパルスでも ASIC への入力過多となって飽和してしまうことがわかった。MPPC のバイアス電圧を下げることでエネルギー範囲の拡大を試みたがうまくいかず、ASIC 自体のパラメータ変更が必要であることがわかった。先に述べた通り、このパラメータ変更は ASIC を新たに設計製作することとなるため、今回はこれ以上の調整を断念した。600 keV 程度以上で非直線性が顕著なことから今回の検出器では線量率の校正は行わず、実証試験ではスペクトルデータの取得と収集が可能かどうかを検証することとした。

7.5 超小型 KURAMA-II の実証試験

今回製作した超小型 KURAMA-II の LPWA ネットワーク経由のデータ収集能力の検証のため、製作した超小型 KURAMA-II 端末 5 台を島根県松江市に持ち込んで、松江市内での ZETA の通信試験後も継続して設置している試験用のネットワークを使った実証試験を行った (図 50)。ZETA の通信容量の制約から、時刻と位置情報でタグづけされた線量率とスペクトルデータを圧縮した上で分割して送信した。概ね 4 分毎に測定データを送った。

松江市内各地から既設の中継局、あるいは当日持参した臨時の中継局を併用することで比較的良好に通信を行うことができた (図 51)。出雲空港出発ロビー窓際に置いて電源を投入した超小型 KURAMA-II は 4 ~ 5 km 離れたサンレイクの中継局に接続し安定な通信を確立するなど、展開は極めて容易であった。また測定データも ZETA 経由で送信することができ、得られた波高スペクトルも天然核種である ^{214}Pb のピークが見えるなど想定されたものが得られている (図 52)。

7.6 超小型 KURAMA-II のまとめ

Single-board Computer と LPWA を活用し、手のひらに乗るサイズの超小型 KURAMA-II を製作した。量産時のコスト低減が期待できる ASIC を使って検出器を製作した。ASIC 搭載のアンプの直線性の良い部分では従来品の CsI(Tl) 検出器とほぼ同等のエネルギー分解能を実現した。さらに超小型 KURAMA-II と既設の ZETA ネットワークを組み合わせた実証試験では面的な展開が容易に実現できることを確認した。

課題である ASIC で製作したアナログ回路系だが、小型化や低廉化により大量の超小型 KURAMA-II を展開するという趣旨から言えば、低コスト化と性能安定に有利な ASIC による放射線検出システムの実装が可能と示せたことに意義がある。なお、ASIC は浜松ホトニクスが設計製造したもので、最適化した ASIC の再設計と製作は技術的には全く問題ないこと、ただし会社側の人員の都合により今回の事業の実施期間内の再製作が困難であるとの回答を得ている。そこで、事業終了後も引き続き最適化の可能性について検討することとした。

また機動的に展開した超小型 KURAMA-II からのデータを ZETA で収集できることを実証した。これにより緊急時にも機動的に展開できるモニタリング体制のあり方を示すことができた。本事業完了後ではあるが、今後検出器の最適化が完了した後で、東電福島第一原子力発電所近郊で展開しての実証試験などを検討したい。



図 50 松江市における超小型 KURAMA-II の実証試験の様子。超小型 KURAMA-II を持ち込んでスマートフォンで測定状況を確認し、通信状況により携行した中継局を近隣に設置して改善の有無を確認した。

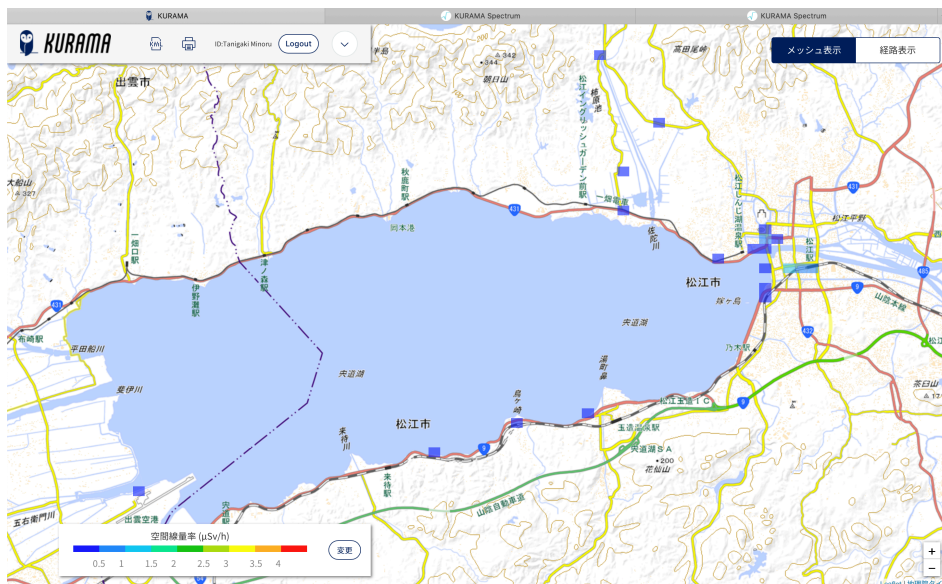


図 51 松江市付近での展開の様子。色付きの四角で測定点とその地点での線量率が示されているが、エネルギー範囲と直線性の問題により線量率の指示値の校正は行っていない結果であることに注意。

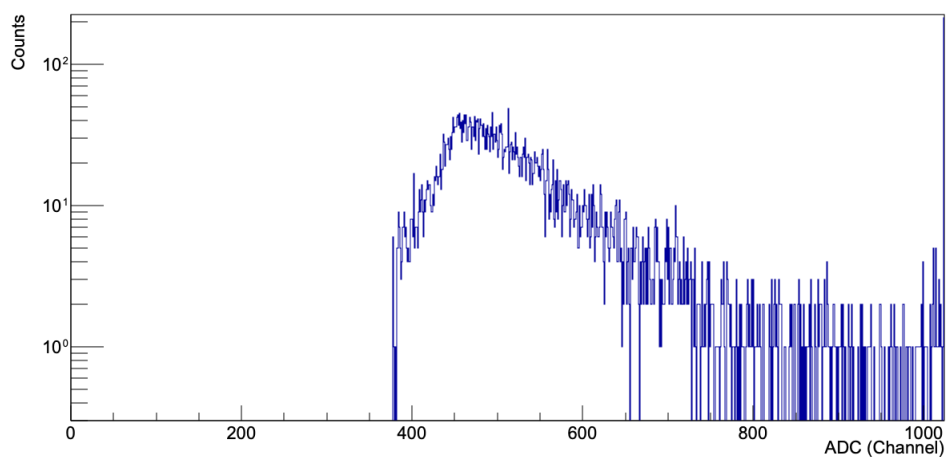


図 52 超小型 KURAMA-II により測定された松江市内での波高スペクトルの例。700 ch 付近に ^{214}Pb のピークらしきものが見える。

8 発災直後の面的な放射線モニタリングの一提案

最後に本研究全体のまとめに代え、本研究の成果を踏まえた発災直後の面的な放射線モニタリングのあり方について考える。

今回の研究により、機動性の高い面的な放射線モニタリングを実現する技術的要素である ZETA のようなメッシュ型 LPWA を用いた自律型ネットワーク技術は、今回の研究対象である緊急時の面的なモニタリング活動だけでなく、すでに展開されている既設のモニタリングポスト等のデータ収集のためのバックアップ回線としても有効な技術であることが示された。

そこで、この自律的ネットワークを平時より既設のモニタリングポストのバックアップ回線として整備しておく（図 53）。これにより、既設モニタリングポストが整備済みの光回線や衛星回線、携帯回線のような通信事業者依存ではない通信手段で多重化を実現できる。LPWA モジュールは基地局、中継局、端末とも他の通信手段に比べて非常に安価であり、通信事業者に依存しないことから回線契約維持の費用もかからず、予備の回線として整備・維持する負担は極めて小さい。また、既設モニタリングポストを結ぶ事で、これまで様々な要因を考慮して検討されてきたモニタリングの必要性の高い地域をくまなくエリア化できるメリットもある。

なお、通信におけるセキュリティについても、例えば今回の研究で使用した ZETA は規格として暗号化プロトコルや指定グループの通信機器のみとの接続を行うホワイトリスト機能を持っており、これらを活用することで確保できる。

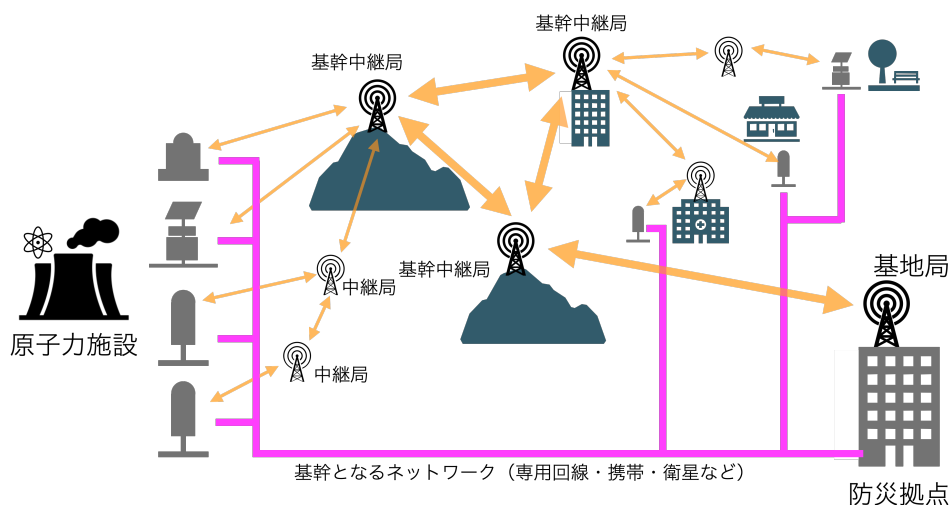


図 53 平常時における自律型ネットワークの展開。安価かつ事業者に依存しないデータ収集のための通信手段による多重化を実現するとともに、これまでに検討されてきたモニタリングの対象とするべき地域をくまなくエリア化できるメリットがある。

実際に災害が発生した時は、このバックアップ回線として整備されている LPWA ネットワークを活用し、今回開発した可搬型モニタリングポストや超小型 KURAMA-II を大量に追加配備して発災直後の面的なモニタリングを実施する（図 54）。可搬型モニタリングポストや超小型 KURAMA-II は既存のモニタリングポストのバックアップ回線である LPWA ネットワークを経由してデータを送信するので、既存のモニタリングポスト等と連携した運用が可能となる。

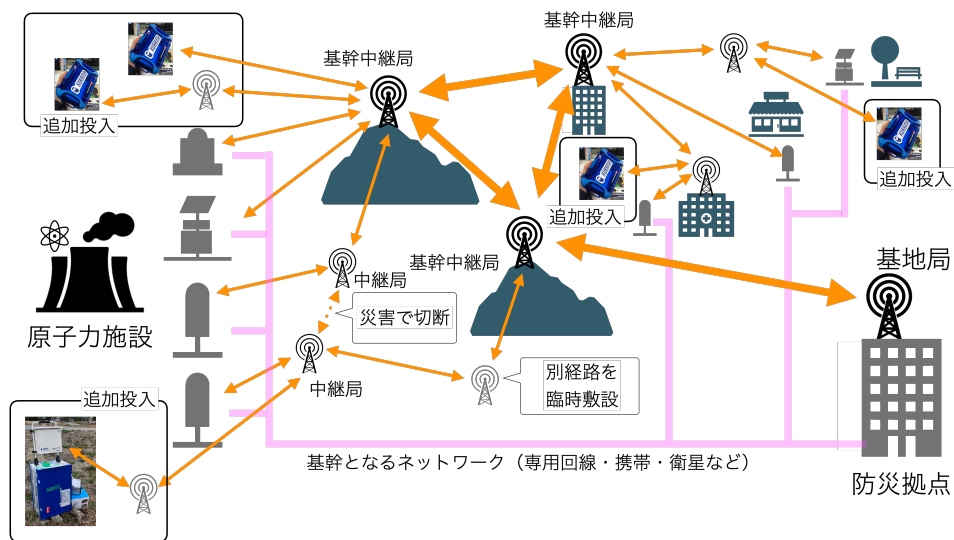


図 54 緊急時における自律型ネットワークを活かしたモニタリング活動の展開。可搬型モニタリングポストや超小型 KURAMA-II は既存のモニタリング機器が使用するバックアップ回線に追加される機器として運用され、既存のモニタリング機器と同様に計測とデータの送信を行う。

なお、東電福島第一原子力発電所事故のような複合災害の場合、自律的ネットワーク自体のダメージも想定される。しかし、今回採用した ZETA のような自律型ネットワークの持っている通信事業者に依存せずネットワークを構築できるメリットや最適通信経路の自動探索機能を活かし、都度機動的に追加の中継局を配置するなどして対応する。また想定外の地域でのモニタリングが必要になった場合も同様の方法で機動的にエリアを拡大していく。

このようにして、平時にも有効に活用できるとともに、緊急時にもシームレスな対応のできる備えを構築することができる。

緊急時の対応は事前の十分な想定と備えとともに、想定外の場合でも引き続き何らかの対処の手段を取り続けることのできる柔軟性や機動性も必要である。今回の研究成果はこれまでの防災体制に柔軟性や機動性を付加するものと位置付けられることから、本研究の技術成果の採用を積極的に進めていくことが強く望まれる。

9 謝辞

本研究にあたっては、可搬型モニタリングポストの特性試験のために日本原子力研究開発機構核燃料サイクル工学研究所計測機器校正施設を使用させていただきました。モニタリングポスト設置箇所や各種県有施設の利用において島根県の協力をいただきました。また LPWA ネットワークの現地試験にあたっては凸版印刷株式会社の協力をいただきました。Spresense 上でのソフトウェア開発にあたってはソニー株式会社の協力をいただきました。関係者に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 佐藤久志, 原発災害発生時における放射線科医の役割 —広域汚染での経験—, 日獨医報 57 (2012) 89–102.
- [2] 三澤真, 永森文雄, 「緊急時迅速放射能影響予測 (SPEEDI) ネットワークシステム」, FUJITSU 59 (2008) 482–489, <http://img.jp.fujitsu.com/downloads/jp/jmag/vol59-5/paper05.pdf>.
- [3] 古田定昭, 住谷秀一, 渡辺 均他, 「福島第一原子力発電所事故に係る特別環境放射線モニタリング結果 -中間報告 (空間線量率、空气中放射性物質濃度、降下じん中放射性物質濃度)-」, JAEA-Review 2011-035, 2011 年 8 月, <https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2011-035.pdf>.
- [4] 文部科学省, 「文部科学省による放射線量等分布マップ (放射性セシウムの土壌濃度マップ) の作成について」, 2011 年 8 月 30 日, https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/6000/5043/24/11555_0830.pdf.
- [5] 原子力規制庁 「緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム (SPEEDI) の運用について」, 2016 年 10 月 8 日, <https://www.nsr.go.jp/data/000027740.pdf>
- [6] 内閣府, 「北海道胆振地方中東部を震源とする地震に係る被害状況等について」, 2018 年 9 月 6 日, http://www.bousai.go.jp/updates/h30jishin_hokkaido/index.html.
- [7] 原子力規制庁 「平成 30 年北海道胆振東部地震でのモニタリングポストに係る教訓と今後の対応方針」, 2018 年, <https://www.nsr.go.jp/data/000249536.pdf>.
- [8] M. Tanigaki, R. Okumura, K. Takamiya et al., “Development of a car-borne γ -ray survey system, KURAMA”, Nucl. Instr. Meth. A726 (2013) 162–168.
- [9] M. Tanigaki, R. Okumura, K. Takamiya et al., “Development of KURAMA-II and its operation in Fukushima”, Nucl. Instr. Meth. A781 (2015) 57–64.
- [10] National Instruments, CompactRIO システム, <https://www.ni.com/ja-jp/shop/compactrio.html>.
- [11] 浜松ホトニクス, C12137 カタログ, 2018 年 6 月, https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/c12137_series_kacc1196j.pdf
- [12] 津田修一, 堤正博, 「種々の大きさの CsI(Tl) シンチレーション検出器の γ 線に対するスペクトル-線量変換演算子 (G(E) 関数) の計算と評価」, Jpn. J. Health Phys. 47 (2012) 260–265.
- [13] 新潟県ウェブページ「原子力防災訓練」, 2019 年 3 月 29 日最終更新, <https://www.pref.niigata.lg.jp/site/houshasen/1265925708350.html>.
- [14] 京セラコミュニケーションシステム, 「Sigfox とは」, <https://www.kccs-iot.jp/service/>.
- [15] LoRa Alliance, “What is the LoRaWAN Specification?”, <https://lora-alliance.org>.
- [16] ZETA Alliance, 「製品紹介」, <https://zeta-alliance.org/zeta.php>.
- [17] WI-SUN Alliance, “Wi-SUN FAN”, <https://www.wi-sun.org/fan/>
- [18] NTT docomo, 「各通信方式の仕様」, <https://www.nttdocomo.co.jp/biz/special/iot/lpwa/spec/>.
- [19] 和泉吉浩 「ちょっとリッチな自営 LPWA 街の不感地帯ゼロ作戦」テレコミュニケーション, 2018 年 2 月号, p.11.
- [20] 地方版 IoT 推進ラボ 「宮崎県内において IoT プロジェクト創出に向けた実証実験を始動!」, 2018 年 3 月 7 日, <https://local-iot-lab.ipa.go.jp/article/miyazaki-pref-iot-3.html>.

- [21] アイティアクセスプレスリリース「ZETA アライアンスの設立」2018年6月4日, http://www.itaccess.co.jp/information/pdf/ZETA_ALLIANCE_PR_20180604.pdf.
- [22] 島根県原子力対策課「島根県地域防災計画（原子力災害対策編）附属資料【平成31年3月修正】」, 2019年3月, https://www.pref.shimane.lg.jp/bousai_info/bousai/bousai/genshiryoku/
- [23] 株式会社サーキットデザイン Web ページ, 2021, <https://www.circuitdesign.jp/technical/radio-wave-propagation-characteristics/>
- [24] SPEEDI 環境放射線モニタリングポスト・原子力関連施設マップ, 2021, <http://agora.ex.nii.ac.jp/earthquake/201103-eastjapan/radiation/speedi/map/>
- [25] 国土地理院ウェブサイト, 2021, <https://maps.gsi.go.jp>
- [26] Sony, 製品情報「Spresense」, 2018, <https://www.sony-semicon.co.jp/products/smart-sensing/spresense/>.
- [27] Sony, 「Spresense ハードウェアドキュメント」, https://developer.sony.com/develop/spresense/docs/hw_docs_ja.html#_spresenseと_arduino_uno_の違い
- [28] 浜松ホトニクス, S14160 シリーズデータシート, 2021, https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s14160_s14161_series_kapd1064e.pdf